Die Stabilisierung eines Niederfrequenzgenerators gegen Schwankungen der Betriebsspannungen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades

genehmigt von der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

Wilhelm Höppner
aus Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Oktober 1939
Tag der Promotion: 30. April 1941

N 4

Die Stabilisierung eines Niederfrequenzgenerators gegen Schwankungen der Betriebsspannungen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades

genehmigt von der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

WILHELM HÖPPNER

aus Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Oktober 1939

Tag der Promotion: 30. April 1941

Referenten :

Professor Dr. A. W e h n e l t

Professor Dr. K. E. S c h u m a n n

Inhaltsübersicht

I. Einleitung 1

II. Theoretischer Teil 2
1. Überblick über die bisherigen Theorien 2
2. Die Wirkung der Verzerrung des Gitterstromes auf die Frequenz des Röhrengenerators mit linearer Charakteristik 3

III. Experimenteller Teil 10
1. Der Generator 11
2. Die Meßmethode 14
3. Meßergebnisse 21
a) Frequenzstabilisation gegen Anodenspannungsänderungen 21
b) Frequenzstabilisation gegen Heizspannungsänderungen 22
c) Stabilisierung der Frequenz gegen Heiz- und Anodenspannungsschwankungen durch das gleiche Stabilisationselement 25
4. Fehlerquellen und Diskussion der Meßergebnisse .. 37
a) Erreichte Stabilität 37
b) Der Einfluß von Gittervorspannungsänderungen . 37
c) Der Stabilisierungsbereich der Stabilisationselemente 40

IV. Zusammenfassung 42

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550807_0160

I. E i n l e i t u n g

Die Frequenz von Röhrengeneratoren ist im allgemeinen nicht vollständig stabil sondern unterliegt Schwankungen.Die Ursachen dieser Frequenzschwankungen sind :

1. Änderungen der Schwingkreisparameter durch Änderungen von Temperatur,Luftfeuchtigkeit und Luftdruck sowie mechanische Erschütterungen und Alterung
2. Änderungen der Röhrendaten durch Temperaturänderung,Alterung oder Auswechseln der Röhren
3. Änderungen der Betriebsspannungen.Als inkonstante Betriebsspannungen kommen vor allem Heizspannung und Anodenspannung in Betracht,während eine eventuelle statische Gittervorspannung wegen des praktisch zu vernachlässigenden Gitterstromes konstant ist.

Der unter 3 genannte Einfluß der Betriebsspannungen auf die Frequenz kommt unter anderem dadurch zustande,daß die die Frequenz mitbestimmenden Röhrendaten spannungsabhängig sind. Die durch Spannungsänderungen bewirkten Änderungen der Röhrendaten sind jedoch reversibel im Gegensatz zu den unter 2 aufgeführten irreversiblen Änderungen der Röhrendaten.

Experimentelle Untersuchungen zur Beseitigung der Frequenzinstabilität werden zweckmäßigerweise mit der unter 3 genannten Ursache der Frequenzänderungen beginnen,da der Einfluß der Betriebsspannungen im allgemeinen am größten ist.Die durch Ausschalten dieses Einflusses erreichbare Stabilität ist dann nur noch durch die unter 1 und 2 genannten Ursachen für die Instabilität begrenzt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist,diesen ersten Schritt zur Stabilisierung für einen Niederfrequenzgenerator durchzuführen.

II. Theoretischer Teil

1. Überblick über die bisherigen Theorien

Die Erklärung der Spannungsabhängigkeit der Frequenz von Röhrengeneratoren ist schon oft das Ziel theoretischer Untersuchungen gewesen [1]) .Man kann bei diesen Arbeiten im wesentlichen drei Gruppen unterscheiden entsprechend den Voraussetzungen,aus denen die Spannungsempfindlichkeit der Frequenz gefolgert wird :

1. die Theorie des Generators bei unbegrenzter linearer Charakteristik und ohne Gitterstrom
2. die Theorie des Generators bei gekrümmter Kennlinie und ohne Gitterstrom
3. die Theorie des Generators bei linearer Charakteristik und sinusförmigem Gitterstrom .

Obwohl keine dieser Theorien eine befriedigende qualitative und quantitative Erklärung der beobachteten Spannungsabhängigkeit der Frequenz gibt,kann man aus ihnen doch allgemeine Regeln für die Einführung von Schaltelementen zur Frequenzstabilisation sowie für die ungefähre Dimensionierung verschiedener Schaltungsparameter ableiten.Es erschien daher angebracht die bei den bisherigen Theorien stets vernachlässigte Wirkung eines stark verzerrten Gitterwechselstromes zu untersuchen,um eventuell auch hieraus einige Gesichtspunkte für die Dimensionierung der Bauelemente spannungsstabiler Generatoren zu gewinnen.Die Berechtigung einer solchen Untersuchung ergab sich schon frühzeitig bei den experimentellen Arbeiten,

---

[1]) K.B.E l l e r , Proc.Inst.Radio Eng.16;1706;1929
E.M a l l e t , Journ.Inst.Electr.Eng.68;578;1930
F.B.L l e w e l l y n , Proc.Inst.Radio Eng.19;2063;1931
Y.K u s u n o s e , S.I s h i k a v a , Proc.Inst.Radio Eng.20;310;1932
J.G r o s z k o v s k i , Proc.Inst.Radio Eng.21;958;1933
K.P.S c h w e i m e r , L.P u n g s : ZS.f.Hochfrequenztechnik 43;181;1934

da sich bereits an den ersten spannungsstabilen Generatoren zeigte, daß die Gitterstrom-Zeit-Kurve eine ausgesprochene Ventilstromkurve mit kurzem, scharfem Maximum und keinesfalls eine Sinuskurve - wie in den unter 3 genannten Theorien - war.

2. Die Wirkung der Verzerrung des Gitterstromes auf die Frequenz des Röhrengenerators mit linearer Charakteristik

Da die experimentellen Versuche zur Stabilisierung der Frequenz nur an Generatoren in Meißnerschaltung (s.Fig.1, S.4) durchgeführt wurden, wurde auch allein für diesen Generatortyp der Einfluß der Verzerrung des Gitterwechselstromes untersucht. Um hierbei zu übersichtlichen Ergebnissen zu gelangen, mußten ähnlich wie bei den oben genannten Theorien einige Vernachlässigungen gemacht werden. So erwies es sich als unbedingt erforderlich, die Krümmung der Röhrencharakteristik unberücksichtigt zu lassen. Ferner mußte vorausgesetzt werden, daß der auftretende Gitterstrom stets so klein ist, daß seine Rückwirkung auf den Anodenschwingkreis vernachlässigt werden kann. Die letztere Bedingung war bei den im experimentellen Teil der Arbeit benutzten Spannungen und der Dimensionierung der in den Gitterkreis eingeführten Schaltelemente stets weitgehend erfüllt.

Unter diesen Voraussetzungen kann man den in Fig.1 dargestellten Generator in seinem stationären Zustand als Resonanzverstärker betrachten, in dessen Gitterkreis eine Wechselspannungsquelle liegt, deren zeitlicher Spannungsverlauf durch $E_0 \cdot \sin \omega t$ beschrieben werden kann und deren Phase um 90° gegen den Strom I_L in der Anodenkreisinduktivität L (s.Fig.1) verschoben ist. E_0 ist hierbei die Amplitude der von I_L an der Gitterkreisspule L_g induzierten Wechselspannung.

In Fig.2 (S.4) ist der Generator als Resonanzverstärker gezeichnet.

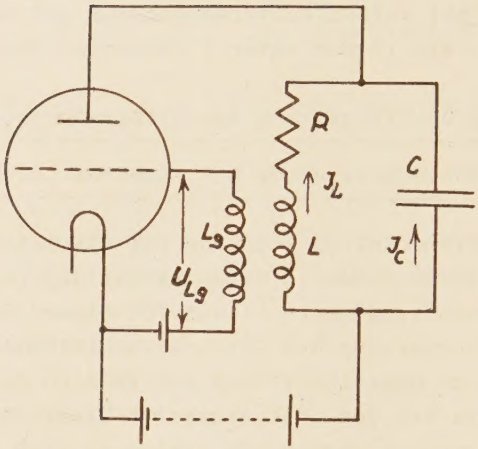

Fig.1 : Der Generator nach M e i ß n e r

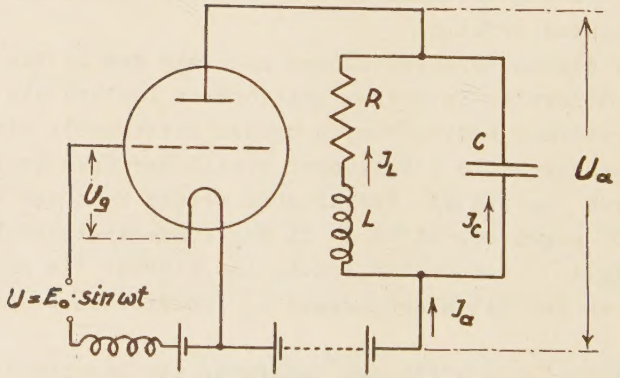

Fig.2 : Ersatzschaltbild

Bei diesem „Resonanzverstärker" bewirkt der zeitweise fließende Gitterstrom, daß die am Gitter liegende Spannung U_g nicht mehr streng sinusförmig ist, sondern etwas verzerrt. Die Bedeutung dieser Verzerrung erkennt man, wenn man U_g in eine Fourierreihe entwickelt. Es ist

$$U_g = U_o + \sum_{k=1}^{k=\infty} (a_k \cdot \cos(k\omega t) + b_k \cdot \sin(k\omega t) = U_o + \sum_{k=1}^{k=\infty} A_k \cdot \sin(k\omega t + \delta_k)$$

wo $tg(\delta_k) = \frac{a_k}{b_k}$.

Berücksichtigt man, daß die auftretenden Verzerrungen gering sind, und der auf die Grundwelle (k=1) abgestimmte Resonanzverstärker die Oberwellen (k>1) nicht verstärkt, so erkennt man, daß man anstatt mit der verzerrten Gitterspannung mit guter Näherung mit

$$U_g = U_o + A_1 \cdot \sin(\omega t + \delta)$$

rechnen kann, wo $tg\delta = a_1/b_1$. Man kann somit die Verzerrung der Gitterwechselspannung U_g rechnerisch ersetzen durch die Phasenverschiebung δ zwischen der an der Induktivität L_g (Fig.1) induzierten Spannung und der Gitterspannung.

Damit die Frequenz trotzdem stationär ist, ist erforderlich, daß die Wirkung dieser Phasenverschiebung auf die Phase des in der Anodenkreisinduktivität L (Fig.2) hervorgerufenen Wechselstromes I_L kompensiert wird. Das ist bei linearer Charakteristik nur möglich, wenn die Betriebsfrequenz ω etwas (um $\Delta\omega$) gegen die „Resonanzfrequenz" ω_o des Verstärkers verstimmt ist. Als „Resonanzfrequenz" wird dabei die Frequenz der Gitterspannung bezeichnet, bei der zwischen I_L und U_g eine Phasenverschiebung von genau 90° besteht.

Im stationären Zustand gibt es also einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der durch die Existenz des Gitterstromes bedingten Phasenverschiebung δ und der Frequenzverstimmung des Generators. Das Vorhandensein eines nicht-sinusförmigen Gitterstromes trägt somit wie folgt zur Spannungsempfindlichkeit der Frequenz bei : ändert man z.B. die

Anodengleichspannung, so verändert sich auch die Amplitude E_o der an der Gitterkreisspule induzierten Wechselspannung. Dadurch wird die Verzerrung der Gitterwechselspannung U_g und somit auch die Phasenverschiebung δ verändert. Zur Kompensation dieser Phasenverschiebung muß die Frequenz eine entsprechende Veränderung erfahren.

Um den mathematischen Zusammenhang zwischen der Frequenzverstimmung $\Delta\nu$ und der Phasenverschiebung δ zu ermitteln, seien auf den Resonanzkreis des in Fig.2 skizzierten Verstärkers die Kirchhoffschen Regeln angewandt.

Bezeichnet man den Anodenwechselstrom mit I_a und die Wechselströme im kapazitiven bzw. induktiven Zweig des Resonanzkreises mit I_C bzw. I_L , so ist nach der ersten Kirchhoffschen Regel

$$I_L + I_C - I_a = 0 \qquad (1)$$

In dieser Gleichung kann man I_a wie folgt durch die Steilheit S und den Durchgriff D der Röhre sowie durch die Gitterspannung U_g und den Wechselspannungsabfall U_a am Resonanzkreis ausdrücken

$$I_a = S \cdot (U_g + D \cdot U_a)$$

Hierbei ist S mit D durch die Gleichung $S \cdot D = 1/R_i$ verknüpft, wo R_i den dynamischen Röhreninnenwiderstand darstellt. Die am Gitter liegende Spannung U_g ist voraussetzungsgemäß um δ gegen die an der Gitterkreisspule des Generators (Fig. 1) induzierte Spannung U_{Lg} phasenverschoben. Für den Spannungsabfall U_a gilt nach der zweiten Kirchhoffschen Regel

$$U_a = - \left(R \cdot I_L + L \cdot \frac{dI_L}{dt} \right)$$

Ersetzt man nunmehr in Gl. (1) noch I_C durch $-C \cdot \frac{dU_a}{dt}$, so kann man alle in Gl.(1) auftretenden zeitlich veränderlichen Größen mit Ausnahme von U_g durch I_L uns seine Ableitungen ausdrücken. Man erhält so die Differentialgleichung

$$LC\cdot\frac{d^2I_L}{dt^2}+\left(RC+\frac{L}{R_i}\right)\cdot\frac{dI_L}{dt}+\left(1+\frac{R}{R_i}\right)\cdot I_L=SU_g=K\cdot\sin(\omega t+\delta) \qquad (2)$$

Dieser Differentialgleichung wird genügt durch den Ansatz

$$I_L = a\cdot\sin(\omega t+\delta-\varkappa) ,$$

wo $\varkappa$,die Phasenverschiebung zwischen U_g und I_L ,gegeben ist durch

$$tg\varkappa=\frac{\omega\cdot\left(RC+\frac{L}{R_i}\right)}{1+\frac{R}{R_i}-LC\cdot\omega^2} , \qquad (3)$$

und a die für das Folgende unwesentliche Amplitude der stationären Schwingung ist.

Bei dem in Fig. 1 dargestellten Generator wird durch I_L an L_g induktiv eine Spannung

$$U_{Lg} = -M\cdot\frac{dI_L}{dt} = E\cdot\cos(\omega t+\delta-\varkappa)$$

erzeugt;dabei ist M die Gegeninduktivität von L und L_g. Damit diese Schwingung in Phase ist mit der Wechselspannungsquelle U im Gitterkreis des Resonanzverstärkers,ist erforderlich,daß die Argumente der Cosinusfunktion in U_{Lg} und $U = E_0\cdot\sin(\omega t)= E_0\cdot\cos(\omega t - 90^\circ)$ übereinstimmen.Somit ist $\delta = \varkappa - 90^\circ$, d.h.

$$-tg\delta = +ctg\varkappa = \frac{1+\frac{R}{R_i}-LC\cdot\omega^2}{\omega\cdot\left(RC+\frac{L}{R_i}\right)} \qquad (4)$$

Aus dieser Gleichung kann man die sich bei gegebenen Schwingkreis- und Röhrendaten sowie vorgegebener Phasenverschiebung δ einstellende stationäre Frequenz ermitteln.

Für das Folgende ist nicht die Absolutfrequenz von Interesse sondern nur deren Abweichung von der„Resonanzfrequenz" ω_0,die Frequenzverstimmung .

Nach der oben gegebenen Definition der „Resonanzfrequenz" erhält man diese aus (3) ,wenn man dort $\varkappa = 90^\circ$ setzt . Somit folgt für ω_0 die Gleichung

$$1+\frac{R}{R_i} - LC\cdot\omega_0^2 = 0 \qquad (5)$$

Zur Einführung der Frequenzverstimmung ersetze man in Gl.(4) LC durch den aus Gl.(5) folgenden Wert

$$LC = \frac{1}{\omega_o^2}\left(1+\frac{R}{R_i}\right)$$

Definiert man die Frequenzverstimmung $\Delta\omega$ durch die Gleichung $\omega_o = \omega - \Delta\omega$, so gilt, da $\frac{\Delta\omega}{\omega} \ll 1$, mit guter Näherung

$$LC = \frac{1+\frac{2\Delta\omega}{\omega}}{\omega^2}\left(1+\frac{R}{R_i}\right)$$

so daß Gl. (4) nunmehr lautet

$$tg\delta = 2\cdot\frac{\Delta\omega\left(1+\frac{R}{R_i}\right)}{\omega^2\left(RC+\frac{L}{R_i}\right)}$$

Somit ist die relative Frequenzverstimmung $\Delta\omega/\omega = \Delta\nu/\nu$, die zur Kompensation der Phasenverschiebung δ erforderlich ist,

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{1}{2}\cdot tg\delta\cdot\omega\cdot\left(RC+\frac{L}{R_i}\right)\quad\frac{1}{1+\frac{R}{R_i}}$$

Da mit guter Näherung stets $\omega \approx 1/\sqrt{LC}$ und $R/R_i \ll 1$, erhält man schließlich

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{1}{2}\cdot tg\delta\cdot\left(R\sqrt{\frac{C}{L}}+\frac{1}{R_i}\sqrt{\frac{L}{C}}\right) \qquad (6)$$

Diese Gleichung gibt an, wie groß die durch eine Phasenverschiebung δ bewirkte relative Frequenzverstimmung $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ ist.

Damit die durch Betriebsspannungsänderungen i.allg. hervorgerufene Änderung der Phasenverschiebung δ eine möglichst geringe Frequenzänderung bewirkt, ist es erforderlich, daß der Faktor von $tg\delta$, die Empfindlichkeit der Frequenz gegen Änderungen des Phasenwinkels δ und damit auch die Spannungsempfindlichkeit der Frequenz, möglichst klein ist, d.h. daß die „Empfindlichkeit"

$$f\left(\frac{L}{C}\right) = R\cdot\sqrt{\frac{C}{L}}+\frac{1}{R_i}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

einen Minimalwert hat.Dieser Minimalwert wird erreicht für

$$\left(\frac{L}{C}\right)_{opt} = R\,R_i \qquad (7)$$

Bei diesem Wert von L/C ist

$$f_{min}\left(\frac{L}{C}\right) = 2\sqrt{\frac{R}{R_i}} \qquad (8)$$

und

$$\left(\frac{\Delta\nu}{\nu}\right)_{min} = \operatorname{tg}\delta\sqrt{\frac{R}{R_i}} \qquad (9)$$

Bei vorgegebenen Widerständen R und R_i gibt es somit unabhängig von der Phasenverschiebung δ ein günstigstes Verhältnis von L/C, das durch Gl.(7) definiert ist .

Aus Gl (8) ersieht man,daß bei optimalem L/C die Frequenzempfindlichkeit mit der Wurzel des Verlustwiderstandes R steigt.

Schon früher haben einige Autoren experimenteller und theoretischer Arbeiten [1] betont,daß für einen gut frequenzstabilen Generator die Schwingkreiskapazität C möglichst groß gewählt werden soll,ohne jedoch eine obere Grenze für C anzugeben.Die obige Rechnung zeigt,daß dieses Ergebnis nur gilt,solange keine Verlustwiderstände im Anodenkreis vorhanden sind [2]. Sowie R einen von Null verschiedenen Wert hat, gibt es ein optimales Verhältnis von L/C .Darüber hinaus ist das Ergebnis hier ohne Voraussetzungen über die Form der Gitterstrom-Zeit-Kurve gewonnen .

Man kann das Resultat auch ohne weiteres auf Generatoren ausdehnen,deren Schwingkreiskapazität nicht verlustfrei ist.Stellt man den Verlust durch einen in den kapazitiven Zweig eingeschalteten Ohmschen Widerstand W dar,der in Reihe mit der Kapazität C liegt,so ist in den Gleichungen (6) bis (9) der Verlustwiderstand R durch die Summe R+W der Verlustwiderstände zu ersetzen.

---

1) Experimentell : K.B. E l l e r , a.a.O.
Theoretisch : Y. K u s u n o s e und S. I s h i k a v a , a.a.O.

2) Diese Voraussetzung ist in der genannten theoretischen Arbeit gemacht worden.

Dimensioniert man L und C so, daß sie der abgeleiteten Bedingung für L/C genügen, so haben die durch Betriebsspannungsänderungen in der oben beschriebenen Art hervorgerufenen Änderungen von δ den geringsten Einfluß auf die Frequenz. Will man den Generator völlig stabilisieren, so gilt es, dafür zu sorgen, daß δ unabhängig von den Betriebsspannungen ist. Um zu untersuchen ob das - wie im experimentellen Teil geschehen - durch Einführung einer geeignet dimensionierten Gitterkreiskapazität C_g mit dazu parallel geschaltetem Widerstand R_g möglich ist, muß die Abhängigkeit der Phasenverschiebung δ von den Betriebsspannungen und den Schaltelementen ermittelt werden. Diese Untersuchung ist mathematisch durchführbar, führt jedoch zu einem viel zu komplizierten Ausdruck für δ, um daraus Bedingungen für eine solche Dimensionierung von R_g, C_g sowie der Gittervorspannung abzuleiten, bei der der Generator unabhängig von den Betriebsspannungen ist.

Die Entscheidung über die Stabilisierungsmöglichkeit des Röhrengenerators liegt daher beim Experiment.

III. Experimenteller Teil

Bei Hochfrequenzgeneratoren sind bereits häufig experimentelle Untersuchungen zur Beseitigung der Spannungsabhängigkeit der Frequenz durchgeführt worden [1].

---

1) Hier sei auf die zahlreichen Schaltungen, die einen Piezoquarz als stabilisierendes Element benutzen, sowie noch besonders auf die folgenden Arbeiten verwiesen :
F. Maske , Phys. ZS. 30; 197; 1929
Lazaref , Jahrbuch d. drahtl. Telegraph. u. Telephon. 33; 55; 1929
C.W. Miller , H.L. Andrews , Rev. Scient. Instr. 1; 267; 1930
E. Mallet , a.a.O.
R. Gunn , Proc. Inst. Radio Eng. 18; 1560; 1930
F.B. Llewellyn , a.a.O.
Y. Kusunose , S. Ishikava , a.a.O.
K.P. Schweimer , L. Pungs , a.a.O.

Eine sehr gute Frequenzstabilität erreichten L l e w e l l y n sowie K u s u n o s e und I s h i k a v a (a.a.O.) durch Einführung eines Kondensators mit einem dazu parallel geschalteten Ohmschen Widerstand in den Gitterkreis. Die genannten Autoren konnten durch geeignete Dimensionierung von Kapazität und Widerstand die benutzten Hochfrequenzgeneratoren (Meißner- bzw. Dreipunktschaltung) gegen Anodenspannungs- und Heizspannungsschwankungen einzeln stabilisieren. Dagegen war es nicht möglich, einen Generator durch ein und dasselbe Schaltelementenpaar gleichzeitig gegen beide Spannungsänderungen zu stabilisieren.

Diese bei Hochfrequenzgeneratoren gewonnenen Ergebnisse sind nicht ohne weiteres auf Niederfrequenzgeneratoren übertragbar, da bei den letzteren die Verluste wesentlich höher sind. Die Verluste aber sind es, die nach dem oben ermittelten Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung und Frequenzverstimmung die Empfindlichkeit der Frequenz gegen Betriebsspannungsschwankungen wesentlich mitbestimmen. Eine Erhöhung des Ohmschen Widerstandes der Schwingkreisinduktivität auf das 100-fache - wie sie im allgemeinen größenordnungsmäßig beim Übergang von Hochfrequenz zu Niederfrequenz eintritt - bewirkt ein Ansteigen der Empfindlichkeit auf das $\sqrt{100}$=10-fache

Im experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie weit das von L l e w e l l y n sowie K u s u n o s e und I s h i k a v a benutzte Stabilisationsverfahren die Frequenz von Niederfrequenzgeneratoren gegen Spannungsschwankungen zu stabilisieren vermag.

1. Der Generator

Bei den Versuchen wurde ein Rückkopplungsgenerator in Meißnerschaltung benutzt. Der Generator ist in Fig.3 (S.12) schematisch dargestellt.

Als Schwingkreiskapazität wurde ein Kondensator-Steckkasten (Kapazitätsbereich : 100 pF bis 0,9999 μF , Papier-

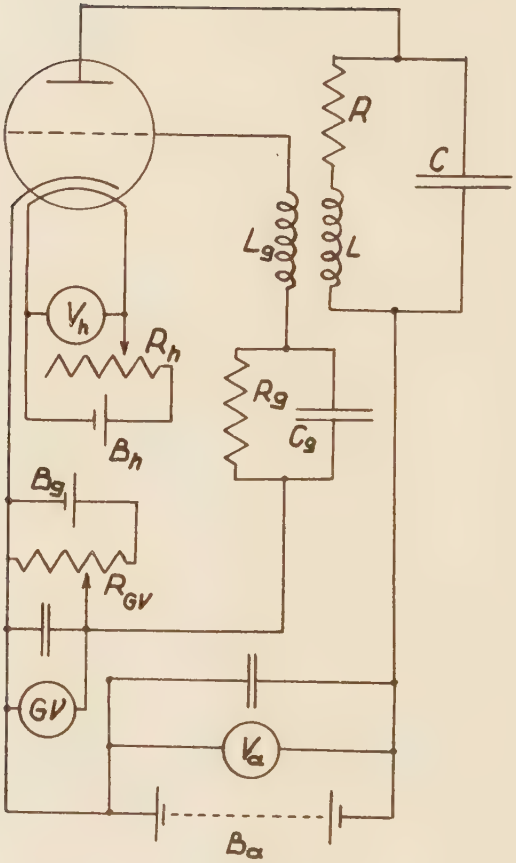

Fig. 3 : Der Generator

dielektrikum) mit einem dazu parallel geschalteten Luft-Drehkondensator (Kapazitätsbereich 400 pF bis 2 000 pF) benutzt.Ersterer diente zur Grobeinstellung der Frequenz, letzterer zur genaueren Abgleichung derselben auf den Sollwert.

Als Schwingkreisinduktivität L wurde eine Normalinduktivität für Niederfrequenz von 0,1 Henry mit einem Ohmschen Widerstand von R = 60Ω verwandt.Dieser Wert von L wurde gewählt,da bei ihm die oben definierte Empfindlichkeit f(L/C) der Frequenz gegen Phasenänderungen der Gitterspannung bei der niedrigsten benutzten Frequenz (750 Hz) dem theoretischen Minimalwert sehr nahe kommt.Da bei der benutzten Röhre R_i= 12 000Ω ist ,folgt für f(L/C) = 0,16 . Der Minimalwert für R = 60Ω ist nur wenig davon verschieden, nämlich $f_{min}(L/C) = 0{,}14$.

Die Gitterkreisspule L_g war eine Normalinduktivität für Niederfrequenz von 0,2 Henry mit einem Ohmschen Widerstand von 1C0 Ohm.Die Kopplung zwischen Gitterkreis- und Anodenkreisspule ergibt sich aus der mit einer Brückenschaltung gemessenen Gegeninduktivität M = 0,02 Henry zu $k = M/\sqrt{LL_g} = 0{,}089$.

Die Werte der für das Stabilisationselement benutzten Kapazitäten und Widerstände sind weiter unten im Zusammenhang mit den Meßergebnissen angegeben.

Als Generatorröhre wurde eine T e l e f u n k e n - Röhre vom Typ AC 2 verwendet.

Als Spannungsquellen dienten für die Anodenspannung Anodenbatterien,für Heizung und Gittervospannung Akkumulatoren.Die Einstellung des gewünschten Heizspannungswertes V_h erfolgte durch den Vorschaltwiderstand R_h (s.Fig.3). Die erforderliche Gittervorspannung (GV) wurde durch Spannungsteilung eingestellt.Dazu waren die Pole des Akkumulators B_g über einen 1000-Ohm-Widerstand R_{GV} kurzgeschlossen.

Zur Vermeidung eines Wechselspannungsabfalles am inneren Widerstand der Anodenbatterie und der Gittervorspannungsquelle wurden diesen hohe Kapazitäten (10 μF bzw.1 μF) parallel geschaltet.

2. Die Meßmethode

Die Abhängigkeit der Generatorfrequenz von den Betriebsspannungen wurde wie folgt ermittelt :

Die am Schwingkreiskondensator des Generators liegende Wechselspannung wurde an das eine Plattenpaar einer Braunschen Röhre gegeben.Am anderen Plattenpaar lag eine in der Physikalisch-Technischen-Reichsanstalt erzeugte Normalfrequenz von 250 Hz,deren Konstanz mit 10^{-8} bis 10^{-9} angegeben ist.Beträgt die Generatorfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Normalfrequenz,so entstehen ruhende Lissajou-Figuren auf dem Leuchtschirm der Braunschen Röhre.Bei nicht genau ganzzahligem Verhältnis zwischen Normalfrequenz und Generatorfrequenz rotiert die Lissajou-Figur.

Wird nach Einregulierung der Genaratorfrequenz auf ein genau ganzzahliges Vielfaches der Normalfrequenz eine der Betriebsspannungen geändert,so bewirkt dieses im allgemeinen eine Rotation der vorher ruhenden Lissajou-Figur.Aus der Rotationsgeschwindigkeit kann auf die Frequenzänderung des Generators zurückgeschlossen werden.

Diesem Verfahren sind dadurch enge Grenzen gesetzt,daß wegen der bald für visuelle Verfolgung zu großen Rotationsgeschwindigkeit der Lissajou-Figur der ausmeßbare Frequenzbereich recht klein ist.

Es ist daher vorteilhafter,die Lissajou-Figur durch eine geeignete Änderung der Schwingkreiskapazität wieder zum Stehen zu bringen.Diese Kapazitätsänderung ist ein Maß für die Frequenzänderung und hat dasselbe Vorzeichen wie diese. Da die bei den Meßreihen vorkommenden größten Kapazitätsänderungen ΔC von der Größenordnung von 1% der Grundfrequenz waren und für die Frequenz ω mit ausreichender Näherung die Thomsonsche Gleichung $\omega^2 = (2\pi\nu)^2 = 1/LC$ angesetzt werden kann,besteht zwischen der gemessenen Kapazitätsänderung ΔC und der dieser entsprechenden Frequenzänderung $\Delta\nu$ die Beziehung

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2}\frac{\Delta C}{C}\cdot\nu \qquad (10)$$

Die Abgleichung der Frequenz auf ruhende Lissajou-Figur erfolgte mit Hilfe des Schwingkreis-Drehkondensators.

Die ersten Messungen der Spannungsabhängigkeit der Frequenz wurden bei 750 Hz mit einer statischen Gittervorspannung von - 4,0 Volt durchgeführt.Als Stabilisationswiderstand R_g [1] wurde ein Halbleiterwiderstand von 1 MΩ benutzt und zu diesem Kapazitäten C_g verschiedener Größen parallel geschaltet.

Für jeden Kapazitätswert C_g wurde bei der Heizspannung V_h= 4,0 V die Abhängigkeit der Frequenz von der Anodenspannung aufgenommen.Anodenspannungsbereich war 196 V bis 232 V.

Fig. 4 (S.16) zeigt ein Beispiel für die ermittelte Abhängigkeit der Frequenz von der Anodenspannung.Abszisse ist die Anodenspannung V_a.Ordinate ist $C-C_o$,d.h.bis auf eine additive Konstante C_o(von der gleichen Größenordnung wie C) die Schwingkreiskapazität C.Kurven von der Art der in Fig.4 dargestellten seien im Folgenden als $C(V_a)$-Kurven bezeichnet.

Bei der Aufnahme der $C(V_a)$-Kurven wurde mit der höchsten benutzten Anodenspannung (ca 232 V) begonnen und in Schritten von 5 bis 6 V zu niedrigeren Anodenspannungen (bis ca.194 Volt) heruntergegangen (1.Kurvenzweig in Fig.4) .Anschließend wurde die Anodenspannung wieder in den gleichen Schritten bis zum ursprünglichen Wert (ca 232 V) gesteigert (2.Kurvenzweig).Aus Fig.4 geht hervor,daß die auf den beiden Wegen gemessenen Kapazitätswerte nicht übereinstimmen,vielmehr ergeben sich bei zunehmender und abnehmender Anodenspannung zwei gegeneinander geneigte Linienzüge.Geht man nach Wiedererreichung der maximalen Anodenspannung wieder schrittweise zu niedrigeren Anodenspannungen über,so verläuft dieser 3.Kurvenzug parallel zum ersten.

Die Lage der Kurvenzüge einer Meßreihe zeigt,daß sich die Frequenz zeitproportional ändert und zwar im Falle der

---

1) Im Folgenden werden dieser Widerstand und die Kapazität C_g in den Fällen,in denen sie wenigstens gegen eine der Spannungsänderungen stabilisieren anstatt mit dem Index „g" mit dem Index „s" bezeichnet werden.

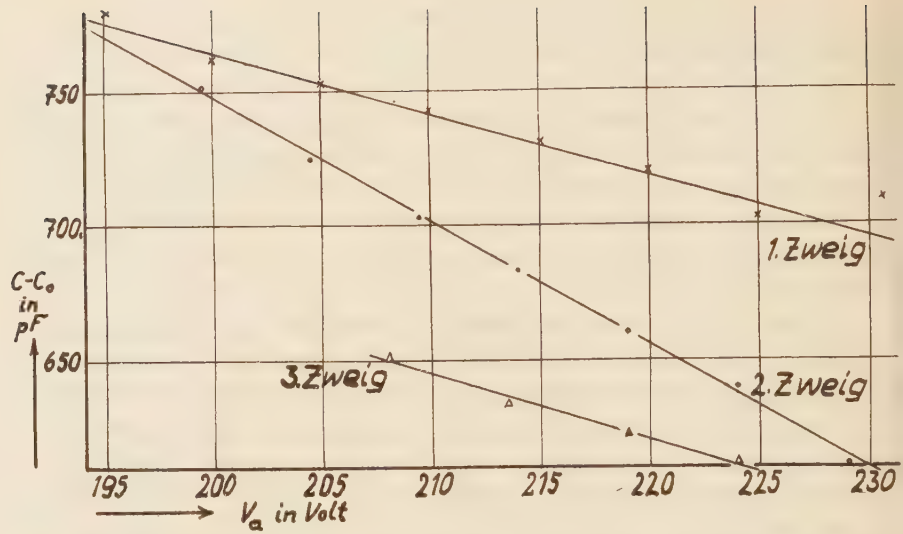

Fig. 4 : $C(V_a)$-Kurve bei ungeschützt aufgestelltem Schwingkreis
ν = 750 Hz ; C_g = 50 000 pF ; R_g = 1 MΩ ; GV = -4,0 V

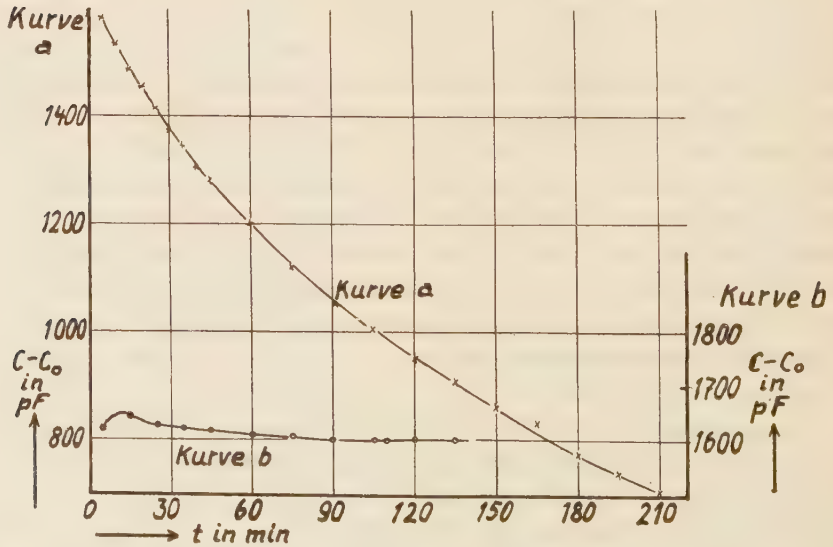

Fig.5 : Die Abhängigkeit der Frequenz ν = 750 Hz von der Betriebsdauer des Generators bei ungeschützt (Kurve a) und geschützt aufgestelltem Schwingkreis (Kurve b).

Fig.4 abnimmt.Um diesen Effekt unabhängig von der Wirkung der Anodenspannungsänderung zu beobachten,wurde die Frequenz des Generators bei konstanter Heiz- und Anodenspannung in ihrem zeitlichen Verlauf verfolgt.Die Frequenzmessungen wurden beim Einschalten des Generators begonnen (Nullpunkt der Zeitzählung). Das Ergebnis einer solchen Meßreihe ist in Fig.5 (S.16) dargestellt (Kurve a) .Man ersieht daraus, daß selbst nach Verlauf von $3\frac{1}{2}$ Stunden noch eine beträchtliche Abnahme der Frequenz pro Stunde zu beobachten ist.

Wie Versuche ergaben,sind Temperaturänderungen der Schwingkreiselemente die Ursache für die etwa zeitproportionale Abnahme der Frequenz während der Aufnahme einer $C(V_a)$-Kurve. Die Versuche zeigten ferner,daß sich diese störende Wirkung der Temperaturempfindlichkeit der Schwingkreiselemente weitgehend ausschalten läßt,wenn man die Induktivitäten und die Schwingkreiskapazität in einen kleinen,wärmeisolierten Raum bringt.Dadurch wird erreicht,daß das thermische Gleichgewicht zwischen Spulen und Kondensatoren einerseits und deren Umgebung andrerseits sich schneller einstellt und dann nicht mehr von außen gestört werden kann.

Es wurden daher die genannten temperaturempfindlichen Teile des Generators in einen Kühlschrank gesetzt,der 0,125 m^3 Luftraum hatte.

Die darauf ausgeführte Messung der Zeitabhängigkeit der Frequenz zeigt,daß nunmehr die Frequenz nach Verlauf von ca. 90 Minuten konstant ist (Kurve b in Fig. 5) .

Größe Anodenspannungsschwankungen werden natürlich auf dem Umweg über entsprechende Änderungen der Spannungsamplituden im Schwingkreis auch weiterhin Temperaturänderungen der Bauteile des Schwingkreises hervorrufen.Die dadurch bewirkten Frequenzänderungen bedingen eine Begrenzung der Genauigkeit bei der Bestimmung von Stabilisationselementen.Um diese Störung der reinen Anodenspannungsabhängigkeit der Frequenz zu vermeiden,wurden keine größeren Anodenspannungsänderungen als die über den genannten Bereich von 196 V bis 232 V vorgenommen.

Fig.6 (S.19) zeigt ein Beispiel für eine $C(V_a)$-Kurve, die nach Einbringung von Spulen und Kondensatoren in den Kühlschrank erhalten wurde.Man ersieht daraus,daß jetzt die Meßwerte für zu- und abnehmende Anodenspannung auf einer Kurve liegen.

Für die Ermittlung der Abhängigkeit der Frequenz von der Heizspannung wurde entsprechend wie bei der Ermittlung der Anodenspannungsabhängigkeit verfahren [1].

Die Messungen wurden bei derselben Frequenz,der gleichen statischen Gittervorspannung und demselben Stabilisationswiderstand R_g durchgeführt.Dem Stabilisationswiderstand wurden wieder Kapazitäten C_g verschiedener Größen parallel geschaltet und für jeden Kapazitätswert - bei konstant gehaltener Anodenspannung V_a = 220 V - die Abhängigkeit der Frequenz von der Heizspannung ermittelt.Heizspannungsbereich war 3,80 - 5,00 V . Fig.7 (S.19) zeigt ein Beispiel für die so aufgenommenen Kurven.Abszisse ist die Heizspannung. Ordinate ist wieder $C-C_o$. Kurven dieser Art seien im Folgenden als $C(V_h)$-Kurven bezeichnet.

Zur Aufnahme der $C(V_h)$-Kurven wurde von der Heizspannung V_h= 3,80 V ausgehend V_h in Stufen von 0,1 oder 0,2 V bis auf V_h= 5,0 V erhöht und dann wieder in den gleichen Stufen bis zum Ausgangswert vermindert.

Auch hier erhält man zwei verschiedene Kurvenzweige bei zunehmender und abnehmender Heizspannung.Steigert man nach einmaligem Durchgang des geschilderten Meßvorganges noch einmal die Heizspannung,so verläuft der neu hinzukommende dritte Kurvenzweig jedoch nicht mehr - wie im Falle der $C(V_a)$-Kurven - parallel zum ersten Zweig (s.Fig.7).

Aus dem Verlauf der $C(V_h)$-Kurven schließt man,daß für die Erklärung des Nichtzusammenfallens der einzelnen Kurvenzweige eine einfache zeitproportionale Frequenzänderung nicht mehr ausreicht.

---

1) Ähnlich wie bei der Aufnahme der $C(V_a)$-Kurven erfolgten auch hier die Messungen zunächst ohne Temperaturschutz für die Schwingkreisbauteile.

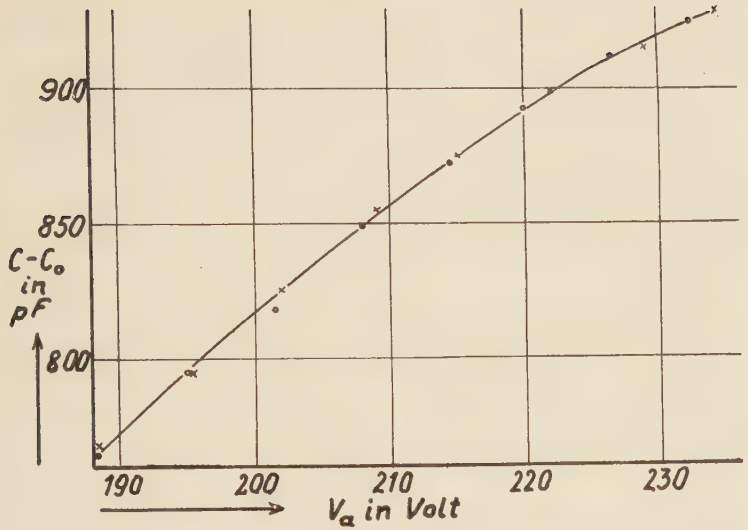

Fig.6 : C(V_a)-Kurve bei wärmeisoliert aufgestelltem Schwingkreis : ×——× : V_a zunehmend ; o——o : V_a abnehmend
ν = 750 Hz ; C_g = 0,1 µF ; R_g = 0,1 MΩ ; GV = -4,0 V

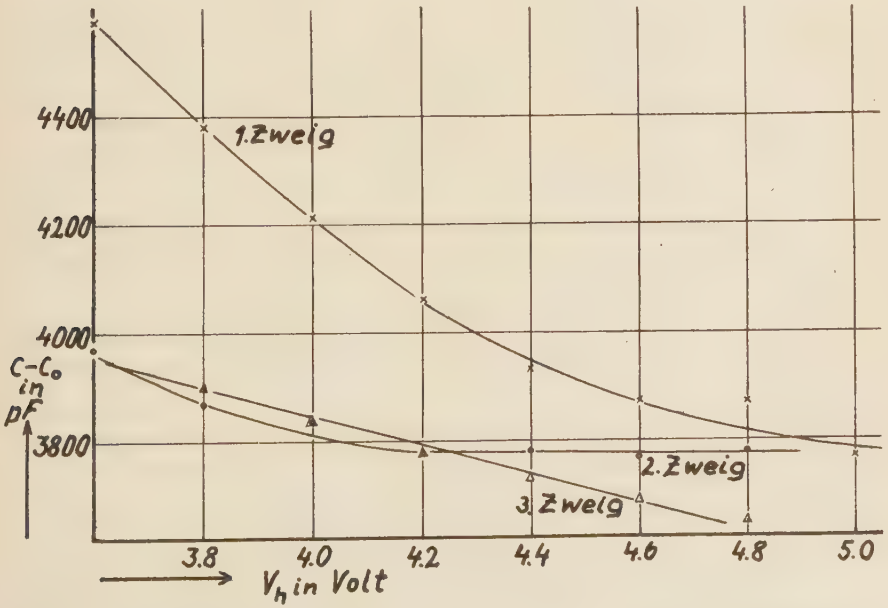

Fig.7 : C(V_h)-Kurve bei ungeschützt aufgestelltem Schwingkreis
ν = 750 Hz ; C_g = 50 000 pF ; R_g = 1 MΩ ; GV = -4,0 V

Für das Zustandekommen dieser Kurvenform können noch folgende Einflüsse maßgebend sein :

1. Änderungen der Schwingkreisdaten : Der durch Heizstromerhöhung verstärkte Anodengleich- und Wechselstrom könnte vielleicht eine stärkere Erwärmung von Spule und Kondensator des Schwingkreises zur Folge haben, die ihrerseits eine Frequenzerniedrigung bewirken würde. Bei darauf folgendem schrittweisen Senken der Heizspannung verhindert die Wärmekapazität der Spule und des Kondensators ein sofortiges Wiederansteigen der Frequenz. Die Wirkung der Heizspannungsänderung muß also nachhinken, wie das auch in Fig.7 der Fall ist.
2. Änderungen der Röhre : die Änderung der Heizleistung bewirkt außer der Emissionsänderung noch eine Änderung der geometrischen Röhrendimensionen, wodurch wiederum die Frequenz beeinflußt wird. Infolge der Wärmekapazität der Röhre ist auch nach dieser Erklärungsmöglichkeit ein Nachhinken der Frequenz gegenüber der Heizspannung zu erwarten .

Von diesen beiden möglichen Ursachen für das Nichtzusammenfallen der einzelnen Zweige der $C(V_h)$-Kurve in Fig.7 dürfte die erstere nur einen unbedeutenden Teil beitragen. Es zeigte sich nämlich, daß die Amplituden der Anodenströme innerhalb des Heizspannungsbereiches (3,8 V - 5,0 V) nicht stärker schwankten als bei Veränderungen der Anodenspannung in dem benutzten Anodenspannungsbereich (194 V - 232 V). Bei den $C(V_a)$-Kurven treten aber solche vom Typ der in Fig.7 dargestellten nicht auf .

Beim Zutreffen der zweiten Erklärungsmöglichkeit könnte man hoffen, durch genügend langes Warten zwischen den einzelnen V_h-Einstellungen und den dazu gehörigen Frequenzmessungen das Nachhinken der Frequenz hinter der Heizung unwirksam zu machen und daher Kurven von der Form der $C(V_a)$-Kurven zu erhalten, bei denen also der dritte Zweig parallel zum ersten verläuft.

Bei diesen Versuchen stellte sich heraus, daß die Zeit, die zwischen der Einstellung einer neuen Heizspannung und dem Augenblick des Erreichens der neuen stationären Frequenz ver-

lief,etwa 30 bis 50 Minuten war.Die Aufnahme einer ganzen $C(V_h)$-Kurve dauerte bei diesem Vorgehen ca.6 bis 8 Stunden. Ferner zeigte sich,daß trotzdem nach Rückkehr zum Ausgangswert der Heizspannung doch nicht wieder die ursprüngliche Frequenz erreicht wird.Auch das Einbringen der Schwingkreiselemente in den Kühlschrank änderte nichts an diesem Verhalten.Diese Erscheinung ist sicher darauf zurückzuführen,daß die durch die Heizspannungsänderungen bedingten Änderungen der geometrischen Röhrendimensionen nicht streng reversibel sind (Alterung) . Außerdem enthalten die nach diesem zeitraubenden Verfahren aufgenommenen $C(V_h)$-Kurven natürlich noch den Einfluß des reversiblen Anteils der Röhrendeformation,geben also ohnehin nicht die gesuchte reine Heizspannungsabhängigkeit.

Es wurden daher alle diese Unzulänglichkeiten bei den später aufgenommenen $C(V_h)$-Kurven (s.S.25 ff) wie folgt eingeschränkt : es wird die Abhängigkeit der Frequenz von der Heizspannung nur durch Messung über den Heizspannungsbereich von 4,0 bis 4,2 V bestimmt,und zwar indem nach Erreichen einer konstanten Frequenz für $V_h = 4{,}0$ V die Heizspannung für zwei Minuten auf 4,2 V erhöht wird,die Frequenz gemessen wird, und dann V_h wieder auf 4,0 V eingestellt wird.

In dieser kurzen Zeit erhöhter Heizung erwärmt sich die Röhre wesentlich weniger,so daß die Deformationen der Röhrenbauteile geringer bleiben und die Irreversibilität kaum eine Rolle spielt.Diese Auffassung bestätigte sich in allen nach dieser Methode durchgeführten Messungen aus der Tatsache,daß mindestens fünf Minuten nach Wiedereinstellung der ursprünglichen Heizspannung ($V_h = 4{,}0$ V) auch wieder die ursprüngliche Frequenz erreicht wurde.

3. Meßergebnisse

a) Frequenzstabilisation gegen Anodenspannungsänderungen

Da auf Grund der Gl. (10) , S.14 , die durch eine Anodenspannungsänderung ΔV_a hervorgerufene Frequenzänderung

$\Delta\nu$ proportional der diese Frequenzänderung kompensierenden Kapazitätsänderung ΔC_a , d.h. proportional

$$\frac{dC}{dV_a}\cdot\Delta V_a \qquad (11)$$

ist, wurden zur Auswertung der $C(V_a)$-Kurven diesen die Werte von dC/dV_a für V_a = 200 , 210 , 220 und 230 V entnommen und der Ausdruck (11) mit ΔV_a = 1,0 V in Fig.8 (S.23) als Funktion des Logarithmus der Gitterkreiskapazität C_g eingetragen.

Man ersieht aus dieser im Folgenden als $\Delta C_a(C_g)$-Kurve bezeichneten graphischen Darstellung, daß es einen Wert C_s von C_g gibt (ca.30 000 pF), für den ΔC_a = 0 , d.h. für den der Generator stabil ist gegen Änderungen der Anodenspannung. Ferner ersieht man aus Fig.8 , daß es eine Gitterkreiskapazität $C_g \approx 500$ pF gibt, für welche die Anodenspannungsempfindlichkeit der Frequenz am größten ist. Das Maximum dieser Empfindlichkeit sinkt mit zunehmender Anodenspannung. Im Übrigen verlaufen die Kurven für alle benutzten V_a-Werte ähnlich. Für C_g-Werte in der Nähe von C_s verschwindet der Einfluß der Anodenspannung und die verschiedenen $\Delta C_a(C_g)$-Kurven gehen ineinander über, wie es bei Stabilität gegen Anodenspannungsänderungen der Fall sein muß.

b) Frequenzstabilisation gegen Heizspannungsänderungen

Zur Auswertung der $C(V_h)$-Kurven [1] wurden diesen die Werte dC/dV_h für V_h = 4,00 , 4,40 und 4,80 V entnommen. Die Größe

$$\Delta C_h = \frac{dC}{dV_h}\cdot\Delta V_h \qquad (12)$$

ist wieder proportional der durch die Heizspannungsänderung ΔV_h bewirkten Frequenzänderung. Sie wurde für ΔV_h = 0,1 V in Fig.9 (S.24) als Funktion des Logarithmus der Gitterkreiskapazität C_g aufgetragen. Die Kurve , im Folgenden als $\Delta C_h(C_g)$-Kurve bezeichnet , ist von der Form der $\Delta C_a(C_g)$-Kur-

1) Die in diesem Abschnitt ausgewerteten $C(V_h)$-Kurven waren noch nach dem auf S.18 beschriebenen Verfahren aufgenommen worden.

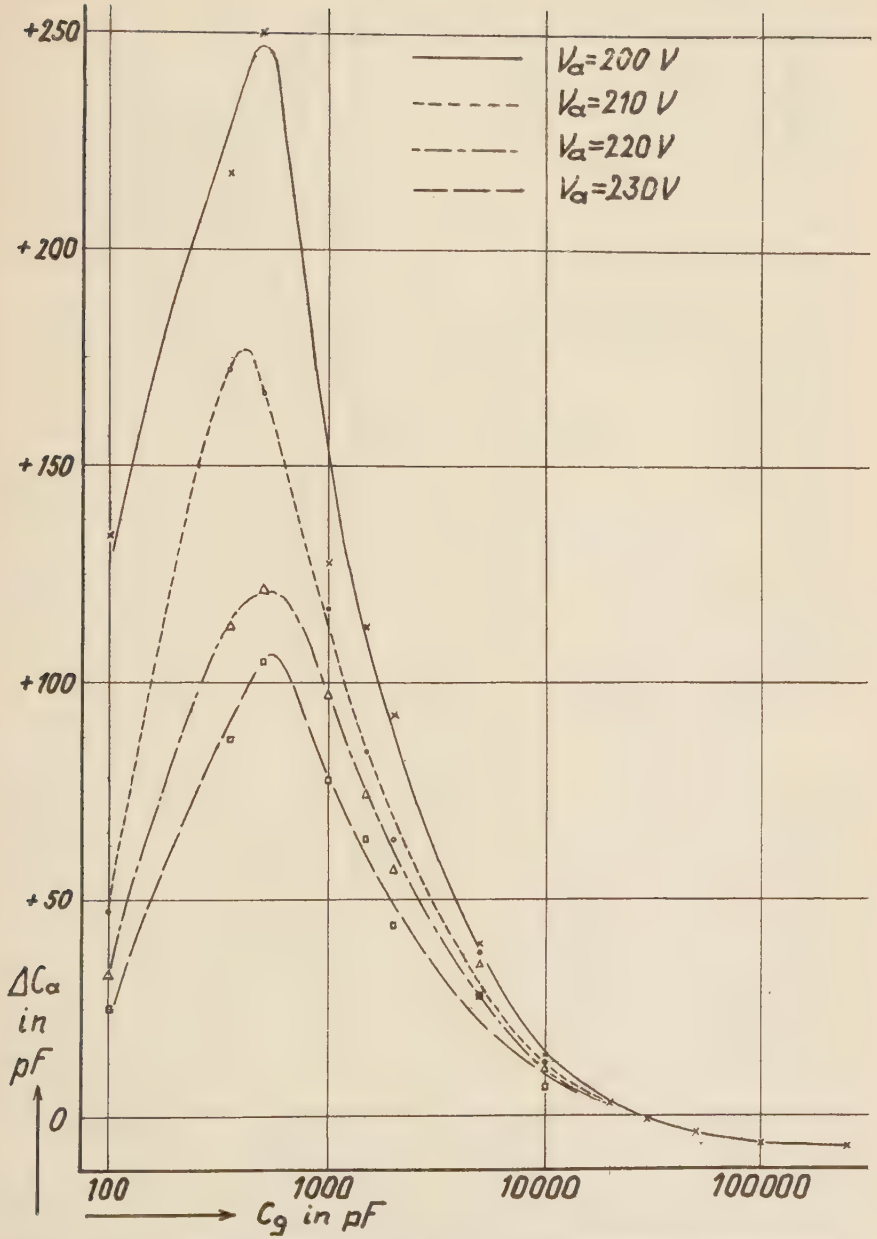

Fig.8 : Frequenzänderung pro 1 Volt Anodenspannungsänderung in Abhängigkeit von der Gitterkreiskapazität C_g und Anodenspannung. ν = 750 Hz ; R_g = 1,0 MΩ ; GV = -4,0 V

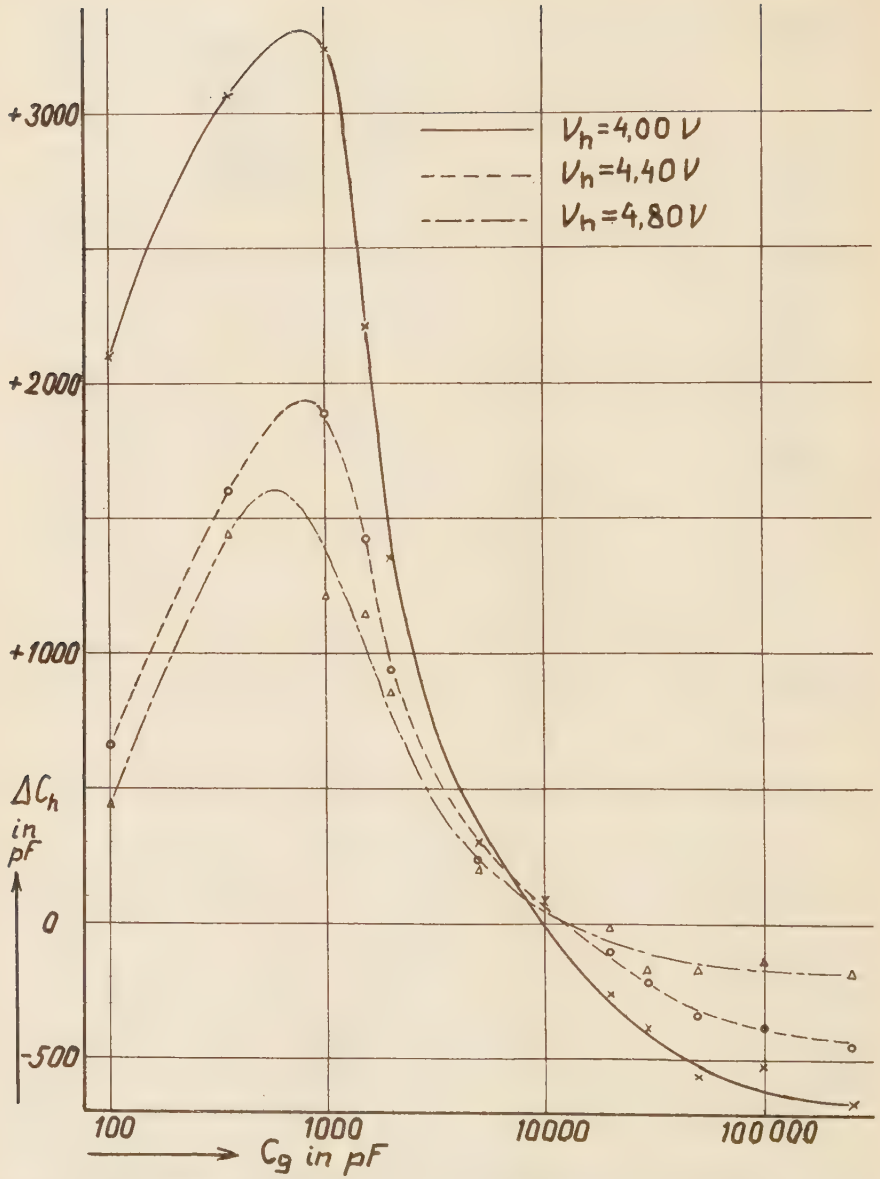

Fig.9 : Frequenzänderung pro 0,1 Volt Heizspannungserhöhung in Abhängigkeit von der Gitterkreiskapazität C_g und Heizspannung. ν = 750 Hz ; R_g = 1,0 MΩ ; GV = -4,0 V .

ve . Es gibt wieder eine Kapazität C_s (ca 13 000 pF), bei der annähernd gleichzeitig für alle $\Delta C_h(C_g)$-Kurven ΔC_h verschwindet , d.h.die Frequenz unabhängig von der Heizspannung ist.Auch eine Gitterkreiskapazität C_g, für welche die Empfindlichkeit der Frequenz gegen Heizspannungsänderungen einen Höchstwert erreicht, ist wieder vorhanden.Die maximale Empfindlichkeit nimmt mit zunehmender Heizspannung ab.

c) Stabilisierung der Frequenz gegen Heiz- und Anodenspannungsschwankungen durch das gleiche Stabilisationselement.

Aus den Figuren 8 und 9 ist zu entnehmen, daß die Kapazitäten C_s für Stabilisation gegen Anodenspannungs- und Heizspannungsänderungen verschieden sind (30 000 pF bzw.13 000 pF).

Es wurde daher versucht, bei gleichbleibender Gittervorspannung durch Wahl anderer Gitterkreiswiderstände R_g die beiden Spannungsänderungen mit gleichem C_s und R_s unwirksam zu machen.

Zur Bestimmung der Kapazitäten C_s, die die Frequenz gegen Anodenspannungsschwankungen stabilisierten, wurden wie oben $C(V_a)$-Kurven aufgenommen und aus diesen in der bereits beschriebenen Art die $\Delta C_a(C_g)$-Kurven bei R_g = 0,1 , 0,2 , 0,5 , 1,0 und 3,0 MΩ ermittelt (Figuren 10-14 , S.26-28). Aus diesen wurden schließlich die Stabilisationskapazitäten abgelesen und in Tabelle I (S.29) eingetragen (in der dritten Spalte der Zeilen für GV = - 4,0 V) . In Fig.15 (S.30) sind die Logarithmen der Stabilisationswiderstände R_s als Funktion der Logarithmen der zugehörigen Stabilisationskapazitäten C_s eingetragen (ausgezogene Kurve mit Index V_a). Kurven dieser Art seien im Folgenden als $R_s(C_s)$-Kurven bezeichnet.

Zwecks Ermittlung der Kapazitäten C_s zur Stabilisation der Frequenz gegen Heizspannungsänderungen wurde das auf S.21 beschriebene abgekürzte Verfahren benutzt.Die so für R_g = 0,2 1,0 und 3,0 MΩ ermittelten $\Delta C_h(C_g)$-Kurven sind in Fig.16-18 (S.31-32) dargestellt. Die daraus abzulesenden Stabili -

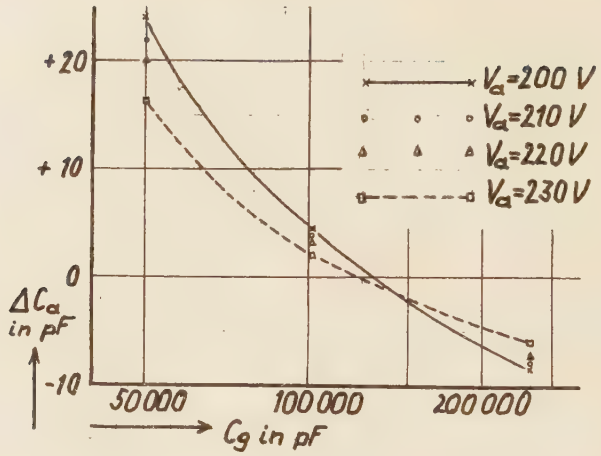

Fig.10 : $\Delta C_a(C_g)$-Kurven für R_g= 0,1 MΩ und verschiedene Anodenspannungen . ν = 750 Hz ; GV = - 4,0 V .

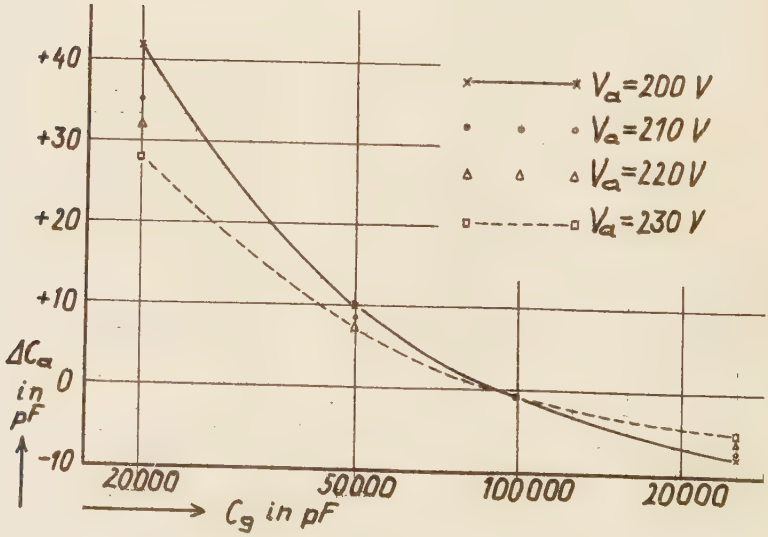

Fig.11 : $\Delta C_a(C_g)$-Kurven für R_g= 0,2 MΩ und verschiedene Anodenspannungen . ν = 750 Hz ; GV = - 4,0 V .

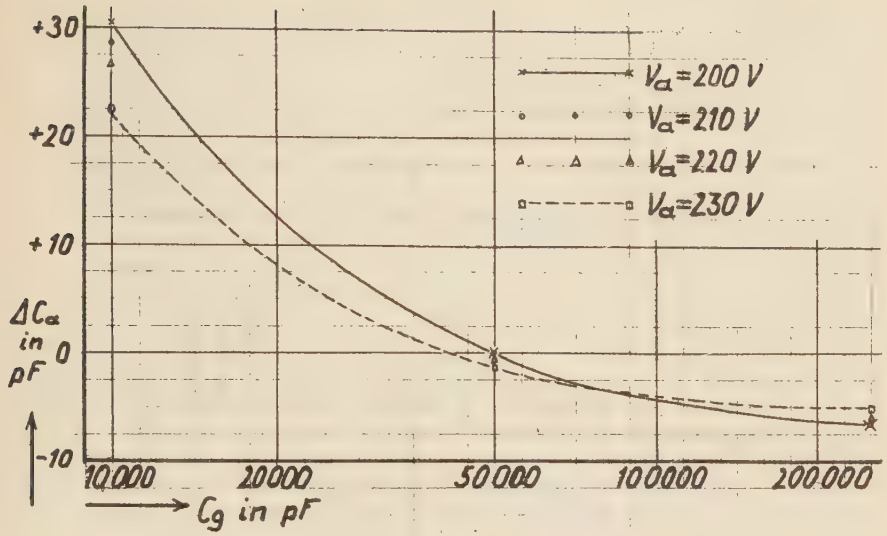

Fig.12 : $\Delta C_a(C_g)$-Kurven für R_g= 0,5 MΩ und verschiedene Anodenspannungen. ν = 750 Hz ; GV = -4,0 V .

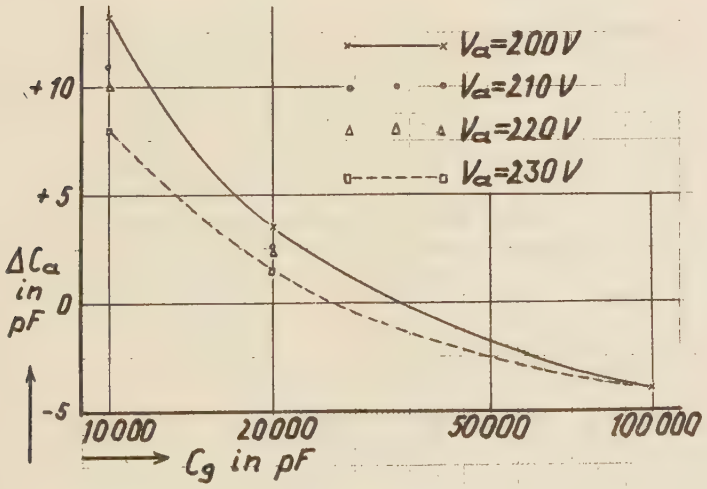

Fig.13 : $\Delta C_a(C_g)$-Kurven für R_g= 1,0 MΩ und verschiedene Anodenspannungen . ν = 750 Hz ; GV = -4,0 V .

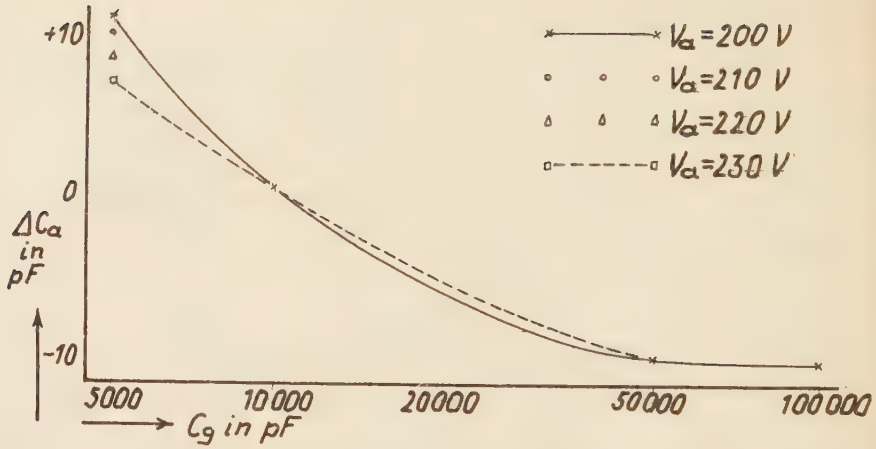

Fig.14 : $\Delta C_a(C_g)$-Kurven für R_g= 3,0 MΩ und verschiedene Anodenspannungen. ν = 750 Hz ; GV = -4,0 V .

sationskapazitäten C_s sind ebenfalls in Tab.I verzeichnet (in der 4.Spalte der Zeilen für GV = - 4,0 V) und im $R_s(C_s)$-Diagramm Fig.15 graphisch dargestellt (ausgezogene Kurve mit Index V_h).

Bei der in Fig.15 gewählten Darstellungsart der Ergebnisse ist die Möglichkeit für gleichzeitige Stabilisation gegen Heiz- und Anodenspannungsschwankungen an den Schnittpunkten der beiden $R_s(C_s)$-Kurven für V_a und V_h gegeben.

Man ersieht daher aus Fig.15,daß gleichzeitige Stabilisation gegen beide Spannungsänderungen bei der benutzten Gittervorspannung (GV = - 4,0 V) nicht möglich ist : die Stabilisationskapazität gegen Anodenspannungsänderungen ist stets etwa doppelt so groß wie die Stabilisationskapazität gegen Heizspannungsänderungen.

Es wurde daher untersucht,ob durch Wahl einer anderen Gittervorspannung gleichzeitige Stabilisation gegen beide Spannungsänderungen erreicht werden kann.Dazu wurden noch die $R_s(C_s)$-Kurven für die Gittervorspannungen GV = - 2,0 , -1,0 ,- 0,8 und -0,5 V aufgenommen.

Tabelle I

GV	R_s	C_s für V_a	C_s für V_h
-4,0 V	0,1 MΩ	116 000 pF	-
-4,0 V	0,2 MΩ	85 500 pF	48 700 pF
-4,0 V	0,5 MΩ	44 900 pF	-
-4,0 V	1,0 MΩ	26 300 pF	11 400 pF
-4,0 V	3,0 MΩ	10 470 pF	4 060 pF
-2,0 V	0,2 MΩ	64 700 pF	40 800 pF
-2,0 V	1,0 MΩ	22 000 pF	9 620 pF
-2,0 V	3,0 MΩ	8 000 pF	4 190 pF
-1,0 V	0,2 MΩ	38 700 pF	34 500 pF
-1,0 V	1,0 MΩ	10 000 pF	8 320 pF
-1,0 V	3,0 MΩ	3 970 pF	3 620 pF
-0,8 V	0,2 MΩ	33 400 pF	33 000 pF
-0,8 V	1,0 MΩ	8 650 pF	8 050 pF
-0,8 V	3,0 MΩ	3 o70 pF	3 300 pF
-0,5 V	0,2 MΩ	26 100 pF	31 800 pF
-0,5 V	1,0 MΩ	6 550 pF	7 890 pF
-0,5 V	3,0 MΩ	1 380 pF	3 130 pF

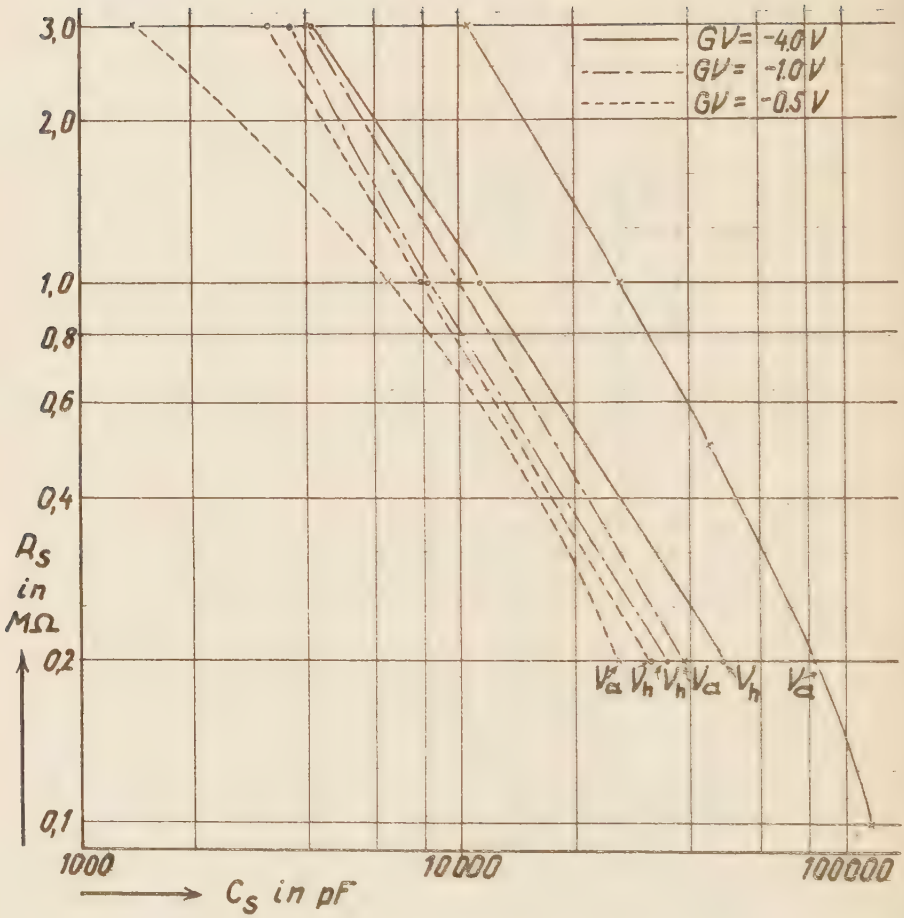

Fig.15 : $R_s(C_s)$-Kurven für Heiz- und Anodenspannung bei verschiedenen Gittervorspannungen , ν = 750 Hz .

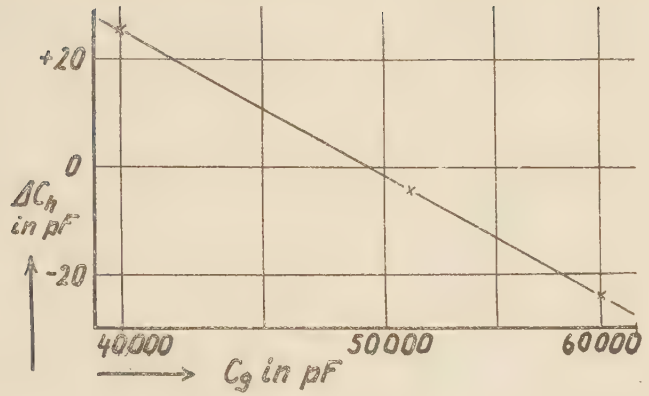

Fig.16 : $\Delta C_h(C_g)$-Kurve für R_g= 0,2 MΩ; ν = 750 Hz ; GV = -4,0 V

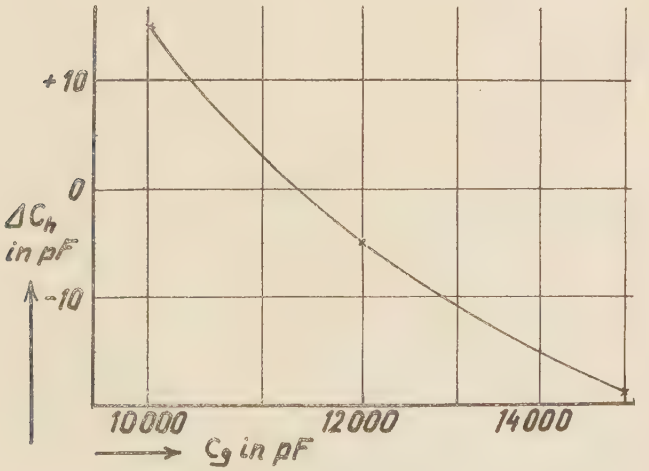

Fig.17 : $\Delta C_h(C_g)$-Kurve für R_g= 1,0 MΩ ; ν = 750 Hz GV = - 4,0 V

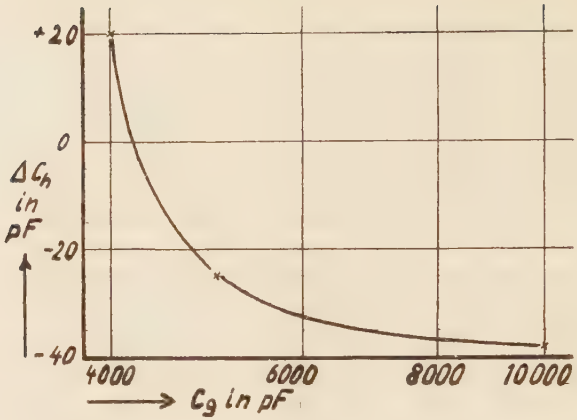

Fig.18 : $\Delta C_h(C_g)$-Kurve für R_g= 3 MΩ; ν = 750 Hz ; GV = -4,0 V .

Die diesen zugrunde liegenden $\Delta C_a(C_g)$-Kurven wurden gewonnen, indem die bei einer Anodenspannungsänderung von 220 auf 238 V erforderliche Kapazitätsänderung ΔC_a als Funktion der jeweiligen Gitterkreiskapazität C_g aufgetragen wurde.

Die $\Delta C_h(C_g)$-Kurven wurden wieder nach dem abgekürzten Verfahren (s.S.21) ermittelt .

Aus den $\Delta C_a(C_g)$-Kurven bzw. $\Delta C_h(C_g)$-Kurven für die verschiedenen Gittervorspannungs- und Widerstandswerte wurden wieder die Stabilisationskapazitäten abgelesen und in Tabelle I eingetragen sowie z.T. in Fig.15 in Form von $R_s(C_s)$-Kurven graphisch dargestellt [1].

Aus diesen $R_s(C_s)$-Kurven ist zu ersehen, daß man beim Verringern der negativen Gittervospannung schließlich einen Generator erhält, für den bei gleichen Stabilisationswiderständen die Stabilisationskapazität gegen Anodenspannungsänderungen kleiner ist als die gegen Heizspannungsänderungen.

---

1) Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die $R_s(C_s)$-Kurven für GV = -2,0 V und -0,8 V nicht in das Diagramm eingezeichnet.

Daraus ist zu schließen, daß es eine Gittervorspannung geben muß, für die bei gleichem Widerstand R_s auch mit ein und derselben Kapazität C_s Stabilisation gegen beide Spannungsänderungen möglich ist.

Um die Schaltelemente für gleichzeitige Stabilisation gegen beide Spannungsänderungen zu ermitteln, wurden bei konstantem Gitterkreiswiderstand R_g die Gittervorspannung GV und die Gitterkreiskapazität C_g solange verändert, bis sowohl bei Anodenspannungsänderungen von V_a = 220 V auf 238 V , als auch bei Heizspannungsänderungen von V_h = 4,00 V auf 4,20 V keine meßbare Frequenzänderung mehr auftrat.

Nach diesem Verfahren wurden die in Tabelle II (Spalte ν = 750 Hz) verzeichneten Elemente für „vollkommene" Stabilisation ermittelt.

Eine Durchführung dieser bisher nur für die Frequenz ν = 750 Hz ausgeführten Messungen bei einer Frequenz von 1 000 Hz lieferte entsprechende Ergebnisse (R_s- und C_s-Werte

Tabelle II

R_s		ν=750 Hz	ν=1 000 Hz
0,2 MΩ	GV	-0,50 V	-0,65 V
	C_s	31 500 pF	21 500 pF
1,0 MΩ	GV	-0,58 V	-0,68 V
	C_s	8 200 pF	6 000 pF
3,0 MΩ	GV	-0,61 V	-0,70 V
	C_s	3 100 pF	2 000 pF

in Tabelle III). Auch hier existieren für geeignete Gittervorspannungen bei jedem Widerstandswert des gewählten R_g-Bereiches Stabilisationskapazitäten C_s, für die die Frequenz gleichzeitig gegen Änderungen beider Betriebsspannungen stabil ist.

Tabelle II (Spalte ν = 1 000 Hz) gibt Werte von R_s, C_s und GV, für die Stabilität erreicht wurde.

Bei einer Wiederholung dieser Bestimmung „vollkommener" Stabilisationselemente, die gleichzeitig auch auf die Frequenz ν = 1 500 Hz ausgedehnt wurde, ergaben sich die in Tabelle IV (S.35) verzeichneten „vollkommenen" Stabilisationselemente. Während die vorhergehenden Messungen mit bereits seit längerer Zeit benutzten Röhren gemacht wurden, erfolgten die Wiederholungsmessungen mit einer fabrikneuen Röhre.

Ein Vergleich der Tabellen II und IV lehrt, daß die Absolutwerte der stabilisierenden Gittervorspannung für die fabrikneue Röhre um 2,5 bis 3,0 V größer sind, als die für die seit längerer Zeit gebrauchten Röhren. Außerdem sind die Stabilisationskapazitäten C_s ca. dreimal so groß wie bei den früheren Messungen.

T a b e l l e III

GV	R_s	C_s für V_a	C_s für V_h
-2,0 V	0,2 MΩ	48 400 pF	25 400 pF
-2,0 V	1,0 MΩ	11 200 pF	6 400 pF
-2,0 V	3,0 MΩ	4 740 pF	2 720 pF
-1,0 V	0,2 MΩ	25 000 pF	22 300 Pf
-1,0 V	1,0 MΩ	7 280 pF	6 120 pF
-1,0 V	3,0 MΩ	2 840 pF	2 720 pF
-0,5 V	0,2 MΩ	18 600 pF	21 500 pF
-0,5 V	1,0 MΩ	5 000 pF	6 500 pF
-0,5 V	3,0 MΩ	1 000 pF	1 570 pF

Die Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten alter und neuer Röhren liegt in der durch die Alterung bedingten Verringerung der Elektronen-Emissionsfähigkeit der Oxydkathode der Röhre. Heizt man nämlich die fabrikneue Röhre mit geringeren Spannungen, so ist Stabilisation auch mit kleineren Kapazitäten C_s und geringeren Gittervorspannungen zu erreichen. Als Beispiel für dieses Verhalten sind in Tabelle V (S.36) Stabilisationselemente für die fabrikneue Röhre bei den Heizspannungen V_h= 3,00 V und V_h= 2,80 V wiedergegeben.

Daß auch bei Verwendung anderer fabrikneuer Röhren vom gleichen Typ der Generator durch zumindest sehr ähnliche Schaltelemente, wie die in Tabelle IV angegebenen stabilisiert wird, zeigte sich bei einigen Proben mit zwei weiteren fabrikneuen Röhren (Kenn-Nummern 147 und 197) . In Tabelle VI (S.36) sind einige Stabilisationselemente für diese Röhren angegeben.

Tabelle IV

R_s		ν= 750 Hz	ν=1 000 Hz	ν=1 500 Hz
0,2 MΩ	GV	-3,50 V	-3,10 V	-2,50 V
	C_s	80 000 pF	42 000 pF	20 000 pF
1,0 MΩ	GV	-3,30 V	-2,50 V	-2,66 V
	C_s	22 000 pF	13 000 pF	9 500 pF
3,0 MΩ	GV	-3,20 V	-2,50 V	-2,70 V
	C_s	9 000 pF	5 500 pF	4 000 pF

Tabelle V

V_h	3,0 V	2,8 V
ν	750 Hz	750 Hz
R_s	0,2 MΩ	0,2 MΩ
C_s	55 000 pF	47 000 pF
GV	-2,0 V	-1,5 V

Tabelle VI

Kenn-Nr.	147	147	197
ν	1 500 Hz	1 500 Hz	1 500 Hz
R_s	0,2 MΩ	1,0 MΩ	1,0 MΩ
C_s	20 000 pF	10 000 pF	10 000 pF
GV	-2,6 V	-2,6 V	-2,6 V

4. Fehlerquellen und Diskussion der Meßergebnisse

a) Erreichte Stabilität

Die bei vollkommener Stabilisation des Generators auftretenden restlichen Frequenzschwankungen infolge der Anodenspannungsänderung von 220 auf 240 V bzw. der Heizspannungsänderung von 4,00 auf 4,20 V sind

für 750 Hz : $\Delta\nu/\nu = 2\ 10^{-6}$
für 1 000 Hz : $\Delta\nu/\nu = 4\ 10^{-6}$
für 1 500 Hz : $\Delta\nu/\nu = 8\ 10^{-6}$

Diese Zahlenwerte ergeben sich aus der Tatsache, daß trotz der genannten Spannungsänderungen keine meßbare Frequenzänderung (gemessen mit dem Schwingkreis-Drehkondensator) auftrat , und daß die kleinste am Schwingkreis-Drehkondensator ablesbare Kapazitätsänderung 2 pF war.

Messungen mit Drehkondensatoren, die eine etwa zehnmal so kleine Kapazitätsänderung noch abzulesen gestatteten, zeigten, daß doch keine größere Stabilität als ca 2 pF erreichbar war.

Diese Begrenzung der Stabilität ist sicher zum großen Teil auf die Temperaturempfindlichkeit der Schwingkreiselemente zurückzuführen. Messungen ergaben nämlich, daß eine Temperaturerhöhung der Schwingkreiselemente um 1° C bei 750 Hz bereits eine Kapazitätsänderung von 200 pF erforderte, um die Frequenz auf dem ursprünglichen Wert zu halten. Frequenzschwankungen, die einer Kapazitätsänderung von 2,0 pF äquivalent sind, entsprechen daher Temperaturänderungen von ca 0,01°C. Temperaturschwankungen dieser Größenordnung sind durchaus plausibel.

b) Der Einfluß von Gittervorspannungsänderungen

Bei der bisherigen Untersuchung der Spannungsabhängigkeit der Frequenz wurde stets vorausgesetzt, daß die Gittervorspannung völlig konstant sei. Dieser Forderung kann praktisch sehr weitgehend genügt werden, indem man die Gittervorspannung ständig kontrolliert und auf dem gewünschten Wert

hält. Schließlich ist aber auch diesem Verfahren eine Grenze gesetzt durch die endliche Genauigkeit,mit der man die Gittervorspannung ablesen und einstellen kann.Es ist daher bei hohen Anforderungen an die Stabilität erforderlich,auch die Abhängigkeit der Frequenz von der Gittervorspannung zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurde nach erfolgter Stabilisierung des Generators die Gittervorspannung um 0,1 V verändert,und die dadurch hervorgerufene Frequenzänderung gemessen.Als Maß für die Frequenzänderung wurde die Kapazitätsänderung $\Delta C(GV)$ benutzt,die erforderlich war,um die durch 0,1 V Gittervorspannungserhöhung bewirkte Frequenzänderung zu kompensieren. In Tabelle VII (S.39) sind die den relativen Frequenzänderungen proportionalen Größen $\Delta C(GV)/C$ für die Stabilisationselemente der Tabelle IV (S.35) eingetragen.

Man ersieht aus diesen Werten,daß die Stabilisationselemente mit größerem Ohmschen Widerstand (R_s = 3 MΩ) im allgemeinen besser stabilisieren,als solche mit kleinerem Ohmschen Widerstand (R_s= 0,2 MΩ). Ferner erkennt man auch, daß höhere Frequenzen unempfindlicher gegen Gittervorspannungsänderungen sind.Im Übrigen sind die durch die genannte Gittervorspannungsänderung bedingten relativen Frequenzänderungen recht klein ($< 80 \cdot 10^{-6}$) .

Um schließlich noch die Heiz- und Anodenspannungsempfindlichkeit bei ungenau bemessener Gittervorspannung zu bestimmen,wurde bei einer um ΔGV = 0,1 V zu großen oder zu kleinen Gittervorspannung die Empfindlichkeit der Frequenz gegen Heiz- und Anodenspannungsänderungen untersucht.Dabei wurde als„Empfindlichkeit" ΔC_a der Frequenz ν gegen Anodenspannungsänderungen die Änderung der Schwingkreiskapazität C bezeichnet,die erforderlich war,um die durch die Anodenspannungsänderung von 220 auf 240 V bewirkte Frequenzänderung zu kompensieren. Entsprechend wurde als Empfindlichkeit ΔC_h der Frequenz gegen Heizspannungsänderungen die Änderung der Kapazität C definiert,die nötig war,um die durch die Heiz-

Tabelle VII

R_s	ν = 750 Hz			ν = 1 000 Hz			ν = 1 500 Hz		
	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ
$\frac{\Delta C(GV)}{C} 10^6$	-78	-64	-49	-59	-71	-67	-58	-42	-33

Tabelle VIII

R_s		ν = 750 Hz			ν = 1 000 Hz			ν = 1 500 Hz		
		0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ
ΔC_a in pF	GV =+0,1 V	+6	+4	0	0	-1,5	0	+1	0	0
	GV =-0,1 V	0	-6	-4	0	-3	0	-0,3	-0,3	-0,9
ΔC_h in pF	GV =+0,1 V	0	+2,5	+4	0	0	+2,5	+0,3	0	0
	GV =-0,1 V	0	0	-2	0	0	0	+0,3	+0,3	0

spannungsänderung von 4,00 auf 4,20 V bedingte Frequenzänderung aufzuheben.

Die gemessenen Empfindlichkeiten sind in Tabelle VIII (S.39) eingetragen : sie sind kaum größer als die Meßgenauigkeit (2 pF , s.S. 37) .

Die Güte der Stabilisation gegen Betriebsspannungsschwankungen nimmt demnach für Gittervorspannungsänderungen von 0,1 V kaum ab.

c) Der Stabilisierungsbereich der Stabilisationselemente

Nachdem der Generator nunmehr für spezielle Frequenzen (750 , 1000 und 1500 Hz) durch geeignete Werte der Gittervorspannung, des Widerstandes R_s und der Kapazität C_s stabilisiert werden kann, ist noch zu klären, bis zu welchem Grade mit diesen Stabilisationselementen auch für andere Frequenzen Unempfindlichkeit gegen Betriebsspannungsschwankungen erreichbar ist .

Dazu wurde der Generator zunächst für die Frequenz ν_0 = 750 Hz stabilisiert, darauf ohne Änderung von R_s, C_s und GV die Frequenz ν = 1 000 Hz eingestellt, und die Empfindlichkeit der Frequenz gegen Betriebsspannungsänderungen ermittelt. Unter „Empfindlichkeit" sei dabei wieder die oben (S.38) definierte Kapazitätsänderung ΔC_a bzw. ΔC_h verstanden.

Analog wurden nach Stabilisierung des Generators für die Frequenz ν_0 = 1 000 Hz die Empfindlichkeiten ΔC_a und ΔC_h für die Frequenzen ν = 750 Hz und ν = 1250 Hz gemessen.

Schließlich wurden noch bei dem für ν_0 = 1 500 Hz stabilisierten Generator die Empfindlichkeiten ΔC_a und ΔC_h für ν = 1 250 Hz und ν = 1 750 Hz ermittelt .

Die Ergebnisse dieser Empfindlichkeitsbestimmungen sind in Tabelle IX (S.41) eingetragen .

Man ersieht aus Tabelle IX, daß die relativen Empfindlichkeiten $\Delta C_a/C$ und $\Delta C_h/C$ gegen Anodenspannungs- bzw. Heizspan-

Tabelle IX

ν		ν_o = 750 Hz R_s=			ν_o = 1 000 Hz R_s=			ν_o = 1 500 Hz R_s=		
		0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ	0,2 MΩ	1,0 MΩ	3,0 MΩ
750 Hz	$c_a/c\ 10^6$	0	0	0	+233	+66	+89			
	$c_h/c\ 10^6$	0	0	0	+55	+31	+44			
1 000 Hz	$c_a/c\ 10^6$	-144	-72	-59	0	0	0			
	$c_h/c\ 10^6$	-43	0	0	0	0	0			
1 250 Hz	$c_a/c\ 10^6$				-74	-55	-49	+120	+37	+25
	$c_h/c\ 10^6$				-12	0	0	+31	+12	+19
1 500 Hz	$c_a/c\ 10^6$							0	0	0
	$c_h/c\ 10^6$							0	0	0
1 750 Hz	$c_a/c\ 10^6$							-60	-24	-12
	$c_h/c\ 10^6$							0	-4	0

nungsänderungen mit zunehmender Frequenz abnehmen. Ferner erkennt man, daß Stabilisationselemente mit höherem Ohmschen Widerstand (z.B. $R_s = 3\ M\Omega$) offenbar einen größeren Frequenzbereich mit einer vorgegebenen Mindestgenauigkeit stabilisieren, als solche mit geringerem Ohmschen Widerstand (z.B. $R_s = 0{,}2\ M\Omega$) . Weiterhin ersieht man aus der Tabelle, daß ein für die Frequenz ν stabilisierter Generator bei einer Frequenzerniedrigung stärker spannungsabhängig wird, als bei einer Erhöhung der Frequenz um den gleichen Betrag.

Für $R_s = 3\ M\Omega$ bleibt bei Benutzung der drei Stabilisationselemente für 750 , 1 000 und 1 500 Hz der Ausdruck $\Delta C_a/C$ bzw. $\Delta C_h/C$ stets kleiner als 10^{-4}. Da auf Grund der Gl.(10) , S.14 , die Frequenzempfindlichkeit $\Delta\nu/\nu$ halb so groß ist wie $\Delta C/C$, erreicht man somit durch die drei Stabilisationselemente über den ganzen Frequenzbereich von 750 bis 1 750 Hz bereits eine Relativfrequenzstabilität von mehr als $5 \cdot 10^{-5}$.

IV . Zusammenfassung

Eine der wesentlichsten Ursachen der Empfindlichkeit der Frequenz gegen Betriebsspannungsänderungen ist das Vorhandensein eines im allgemeinen nicht-sinusförmigen Gitterstromes. Im theoretischen Teil der Arbeit wird eine Regel für eine solche Dimensionierung der Schwingkreisparameter des Generators in Meißnerschaltung abgeleitet, bei welcher die durch die Existenz des Gitterstroms bedingte Spannungsempfindlichkeit der Frequenz einen Minimalwert erreicht.

Im experimentellen Teil der Arbeit wird versucht, die Frequenz eines Niederfrequenzgenerators durch Einführung einer Parallelschaltung von Widerstand (R_s) und Kapazität (C_s) in den Gitterkreis gegen Schwankungen von Heiz- und Anodenspannung zu stabilisieren.

Dabei zeigt sich, daß zu jedem Gitterkreiswiderstand R_s aus dem Bereich $0{,}2\ M\Omega \leq R_s \leq 3{,}0\ M\Omega$ eine Gitterkreiskapazität C_s und eine Gittervorspannung GV existieren, für welche die Frequenz des benutzten Generators unabhängig wird von Spannungsschwankungen innerhalb des Anodenspannungsbereiches von 220 bis 240 Volt und des Heizspannungsbereiches von 4,00 bis 4,20 Volt .

Es wurden Stabilisationselemente dieser Art mit $R_s = 0{,}2$, $1{,}0$ und $3{,}0\ M\Omega$ für die Frequenzen 750 , 1 000 und 1 500 Hz bestimmt. Die hiermit erreichte Frequenzstabilität ist

$$\text{für } \nu = 750 \text{ Hz} : \quad \Delta\nu/\nu = 2 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{für } \nu = 1\,000 \text{ Hz} : \quad \Delta\nu/\nu = 4 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{für } \nu = 1\,500 \text{ Hz} : \quad \Delta\nu/\nu = 8 \cdot 10^{-6}$$

Die für die Frequenz ν Hz ermittelten Stabilisationselemente stabilisieren nicht nur die Frequenz ν Hz allein sondern auch noch recht gut den Frequenzbereich $\nu - 250\ \text{Hz} \leq \nu \leq \nu + 250\ \text{Hz}$ und zwar um so besser, je größer der Gitterkreiswiderstand R_s ist. Wählt man $R_s = 3\ M\Omega$, so kann man mit Hilfe der Stabilisationselemente für $\nu = 750$, 1 000 und 1 500 Hz den ganzen Frequenzbereich von 750 bis 1 750 Hz mit einer Mindest-Relativstabilität der Frequenz von $5 \cdot 10^{-5}$ stabilisieren.

Zum Schluß dieser Arbeit möchte ich nicht versäumen, Herrn Professor Dr. A. W e h n e l t sowie dem Leiter der Forschungsabteilung im Heeres-Waffenamt, Herrn Ministerialdirigent Professor Dr. E. S c h u m a n n , für ihr stetes förderndes Interesse herzlich zu danken .

Herrn Dr. W. S c h w i e t z k e bin ich für seine unermüdliche beratende Anteilnahme bei der Durchführung dieser Arbeit zu größtem Dank verpflichtet.

Lebenslauf

Am 2. Juli 1915 wurde ich, Wilhelm Höppner, als Sohn des jetzt verstorbenen Postinspektors Josef Höppner und seiner Ehefrau Maria-Magdalena, geb. Höppner, zu Berlin-Pankow geboren. Von Ostern 1921 bis Ostern 1925 besuchte ich die 6. Volksschule zu Berlin-Pankow, um dann in die dortige Oberrealschule überzugehen. Dort bestand ich Ostern 1934 die Reifeprüfung. Im Sommerhalbjahr 1934 genügte ich der Arbeitsdienstpflicht.

Zum Wintersemester 1934/35 bezog ich die Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin. Hier und an der Technischen Hochschule zu Charlottenburg widmete ich mich bis Ende August 1939 dem Studium der Physik, Mathematik und Astronomie. Bei Kriegsausbruch wurde ich zum Heer einberufen, dem ich zur Zeit noch angehöre.

Die vorliegende Arbeit wurde unter Anleitung von Herrn Professor Dr. A. Wehnelt in der Zeit vom Mai 1938 bis Ende August 1939 am I. Physikalischen Institut der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin angefertigt.